

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 13974

(13) С1

(46) 2011.02.28

(51) МПК (2009)

G 01H 9/00

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ВИБРАЦИИ ОБЪЕКТА

(21) Номер заявки: а 20070721

(22) 2007.06.12

(43) 2009.02.28

(71) Заявитель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(72) Авторы: Волковец Александр Иванович; Гусинский Александр Владимирович; Кострикин Анатолий Михайлович; Руденко Дмитрий Филиппович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники" (ВУ)

(56) GB 2310099 A, 1997.

BY 5035 C1, 2003.

SU 1585692 A1, 1990.

SU 672500, 1979.

SU 1293497 A1, 1987.

РУДЕНКО Д.Ф. и др. СВЧ бесконтактный измеритель динамического состояния объектов: II Международная научная конференция по военнотехническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения. - Минск, 2005. - С. 103-104.

РУДЕНКО Д.Ф. и др. Радиоволновой измеритель параметров вибрации: 15-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". - Севастополь, 2005. - С. 829-830.

(57)

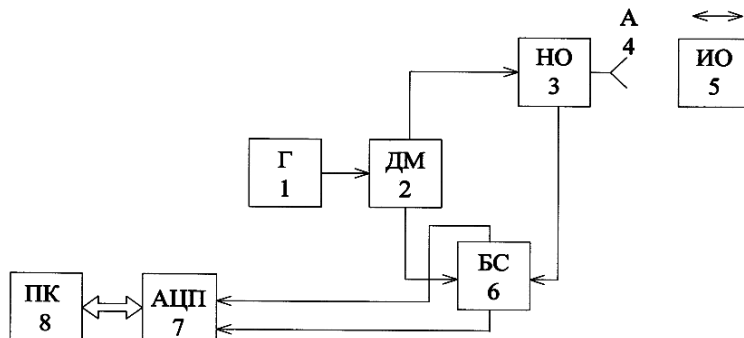
Способ измерения амплитуды вибрации объекта, характеризующийся тем, что исследуемый объект посредством антенны зондируют СВЧ-сигналом фиксированной частоты в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, принимают отраженный от исследуемого объекта сигнал $S_1(t)$ вида

$$S_1(t) = A_1 \cos[2\pi f_0 t + \varphi_1 + \varphi_B(t)],$$

где A_1 - амплитуда отраженного сигнала;

f_0 - частота зондирующего сигнала;

φ_1 - фазовый сдвиг отраженного сигнала в СВЧ измерительном тракте на выходе комплексного балансного смесителя;



ВУ 13974 С1 2011.02.28

$\varphi_B(t) = \varphi_{BM} \sin 2\pi f_B t$ - изменение фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта;

φ_{BM} - амплитудное значение изменения фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта;

f_B - частота вибрации,

смешивают в комплексном балансном смесителе отраженный сигнал с опорным сигналом, в качестве которого берут часть зондирующего сигнала, и получают после фильтрации и усиления на выходе комплексного балансного смесителя квадратурные сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$ вида

$$U_1(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \cos[(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_B(t)];$$

$$U_2(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \sin[(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_B(t)],$$

где A_2 - амплитуда опорного сигнала;

φ_2 - фазовый сдвиг между опорным сигналом на входе комплексного балансного смесителя и исходным зондирующим сигналом,

преобразуют сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$ в цифровую форму в виде набора мгновенных значений $U_1(t_i)$ и $U_2(t_i)$ посредством быстродействующего двухканального аналого-цифрового преобразователя, частоту опроса которого выбирают много большей максимального значения частоты вибрации исследуемого объекта, для каждой пары полученных значений $U_1(t_i)$ и $U_2(t_i)$ вычисляют мгновенные значения фазового сдвига φ_i по выражению:

$$\varphi_i = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_B(t_i) = \arctg \frac{U_2(t_i)}{U_1(t_i)},$$

из полученных значений φ_i определяют φ_{\min} и φ_{\max} , вычисляют значение φ_{BM} по выражению:

$$\varphi_{BM} = \frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2},$$

а амплитуду вибрации D_M определяют по выражению:

$$D_M = \frac{C}{4\pi f_0} \varphi_{BM},$$

где C - скорость света.

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для бесконтактного измерения амплитуд вибраций в теплоэнергетике, газовой промышленности, машиностроении, авиастроении и других областях.

Известен бесконтактный способ измерения вибрации, основанный на использовании оптических систем [1], заключающийся в том, что формируют опорные и отраженные от исследуемого объекта пучки когерентного излучения; получают поле интерференции путем их пространственного совмещения; смещают частоту излучения в опорном плече интерферометра на величину, меньшую $\omega_B/2$, где ω_B - круговая частота вибрации объекта измерения; путем модуляции оптической разности хода лучей интерферометра с частотой, намного меньшей ω_B , получают сигнал, пропорциональный яркости поля интерференции; выделяют из него гармоническую составляющую на частоте, равной частоте модуляции, и по ее величине судят об измеряемой амплитуде вибрации.

Однако для данного способа характерны сложность, громоздкость, высокая стоимость оборудования, жесткие требования к качеству и температуре поверхности исследуемого объекта, к состоянию атмосферы (влажность, отсутствие запыленности и т.п.).

Известен бесконтактный радиоволновой способ, реализованный в устройстве для измерения амплитуд вибраций [2], согласно которому зондируют с помощью антенны ис-

следуемый объект СВЧ-сигналом фиксированной частоты, принимают отраженный от объекта измерения сигнал, смешивают зондирующий и отраженный сигналы в измерительной линии, в результате чего образуются стоячие волны. Смещение исследуемого объекта относительно антенны приводит к смещению стоячих волн в измерительной линии (появляется переменная составляющая сигнала). Амплитуда переменной составляющей сигнала будет приблизительно пропорциональна амплитуде вибраций. Для обеспечения требуемой чувствительности измерений необходимо соблюдать следующие условия: фиксированные расстояния от антенны до СВЧ-детектора (обеспечивается с помощью ползунка измерительной линии) и от антенны до исследуемого объекта (обеспечивается путем перемещения антенны).

Известен бесконтактный радиоволновой способ, реализованный в устройстве для измерения амплитуд вибраций [3], согласно которому зондируют с помощью антенны исследуемый объект СВЧ-сигналом фиксированной частоты, принимает отраженный от объекта измерения сигнал вида

$$S_1(t) = A_1 \cos[2\pi f_0 t + \varphi_1 + \varphi_B(t)],$$

где A_1 - амплитуда отраженного сигнала;

f_0 - частота зондирующего сигнала;

φ_1 - фазовый сдвиг отраженного сигнала в СВЧ измерительном тракте;

$\varphi_B(t) = \varphi_{BM} \sin(2\pi f_B t)$ - изменение фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта;

φ_{BM} - амплитудное значение изменения фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта;

f_B - частота вибрации,

смешивают в двойном Т-образном мосте или четырехплечем циркуляторе отраженный сигнал и часть зондирующего сигнала (опорный сигнал) вида

$$S_2(t) = A_1 \cos(2\pi f_0 t + \varphi_1 + \pi),$$

при этом равенство по амплитуде и противофазность отраженного и опорного сигналов обеспечиваются путем регулировки аттенюатора и подвижного короткозамыкающего поршня, включенного в плечо Т-образного моста, или местом расположения специального штыря в волноводе между антенной и плечом циркулятора и глубиной его погружения в волновод; для случая, когда амплитуда вибрации гораздо меньше длины волны зондирующего сигнала, т.е. φ_{BM} достаточно мало, результирующий сигнал, подаваемый на СВЧ-детектор, имеет вид

$$S_3(t) = S_1(t) + S_2(t) \approx -A_1 \cdot \varphi_B(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t + \varphi_1),$$

и амплитуда выходного сигнала СВЧ-детектора будет пропорциональна амплитуде ви-

браций D_M ($D_M = \frac{C}{4\pi f_0} \varphi_{BM}$), где C - скорость света.

Приведенные бесконтактные радиоволновые способы измерений свободны от недостатков, свойственных способам с использованием оптических систем. Однако недостатками и этих способов являются, во-первых, недостаточная чувствительность измерений, обусловленная ограниченным динамическим диапазоном СВЧ-детектора, во-вторых, сложность и трудоемкость калибровочных процедур, которые должны проводиться с использованием исследуемого объекта, и, вследствие этого, невозможность автоматизации процесса измерения (из-за необходимости позиционирования отдельных элементов измерителя и самого измерителя относительно исследуемого объекта при использовании измерительной линии или наличия регулирующих элементов при использовании Т-образного моста или четырехплечевого циркулятора), в-третьих, ограничение верхнего значения измеряемой амплитуды вибраций из-за необходимости выполнения условия малости значения φ_{BM} .

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является бесконтактный радиоволновой способ измерения амплитуд вибраций, реализованный в радаре для обнаружения

вибрации [4], заключающийся в том, что зондируют с помощью основной антенны исследуемый объект СВЧ-сигналом фиксированной частоты, принимают от исследуемого объекта отраженный СВЧ-сигнал вида

$$S_1(t) = A_1 \cos[2\pi f_0 t + \varphi_1 + \varphi_B(t)],$$

смешивают в комплексном балансном смесителе отраженный сигнал и часть зондирующего сигнала (опорный сигнал) и получают после фильтрации и усиления на выходе комплексного балансного смесителя квадратурные сигналы вида

$$U_1(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \cos[(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_B(t)];$$

$$U_2(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \sin[(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_B(t)],$$

где A_2 - амплитуда опорного сигнала;

φ_2 - фазовый сдвиг между опорным сигналом на входе комплексного балансного смесителя и исходным зондирующим сигналом;

калибровочная процедура включает в себя снятие множества значений сигналов $U_1(t)$, $U_2(t)$, и после их усреднения (при этом среднее значение $\varphi_B(t)$ стремится к нулю) рассчитываются значения A_1 и $(\varphi_1 - \varphi_2)$; с учетом этих рассчитанных значений с помощью регулируемых СВЧ-аттенюатора и фазовращателя воспроизводят дополнительный зондирующий СВЧ-сигнал, который после отражения от поверхности дополнительной антенны имеют амплитуду A_1 и фазовый сдвиг $(\varphi_1 - \varphi_2)_C = \varphi_1 - \varphi_2 + \pi$; т.к. этот сигнал складывается с отраженным сигналом, то на выходе комплексного балансного смесителя будут квадратурные сигналы вида

$$U'_1(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \cos \varphi_B(t) \approx 0;$$

$$U'_2(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \sin \varphi_B(t) \approx \frac{1}{2} A_1 A_2 \cdot \varphi_B(t);$$

амплитуда выходного сигнала $U'_2(t)$ будет пропорциональна амплитуде вибраций D_M

$$(D_M = \frac{C}{4\pi f_0} \varphi_{BM}).$$

Однако данный способ, несмотря на обеспечение высокой чувствительности измерения благодаря использованию комплексного балансного смесителя, имеет ряд недостатков: во-первых, сложность и трудоемкость калибровочной процедуры, которая должна проводиться на месте установки измерителя амплитуды вибраций, и, вследствие этого, невозможность автоматизации процесса измерения (из-за необходимости использования регулирующей системы - регулируемых СВЧ-аттенюатора и фазовращателя); во-вторых, ограничение верхнего значения измеряемой амплитуды вибраций из-за необходимости выполнения условия малости значения φ_{BM} .

Задача изобретения - автоматизация процесса измерения и увеличение верхнего значения измеряемой амплитуды вибраций.

Задача достигается тем, что известный бесконтактный радиоволновой способ измерения амплитуд вибраций, согласно которому зондируют с помощью антенны исследуемый объект СВЧ-сигналом фиксированной частоты, принимают от исследуемого объекта отраженный сигнал вида

$$S_1(t) = A_1 \cos[2\pi f_0 t + \varphi_1 + \varphi_B(t)],$$

где A_1 - амплитуда отраженного сигнала;

f_0 - частота зондирующего сигнала;

φ_1 - фазовый сдвиг отраженного сигнала в СВЧ измерительном тракте (на выходе комплексного балансного смесителя);

$\varphi_B(t) = \varphi_{BM} \sin 2\pi f_B t$ - изменение фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта;

ВУ 13974 С1 2011.02.28

$\Phi_{\text{ВМ}}$ - амплитудное значение изменения фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта;

$f_{\text{В}}$ - частота вибрации,

смешивают в комплексном балансном смесителе отраженный сигнал с опорным сигналом, в качестве которого берут часть зондирующего сигнала, и получают после фильтрации и усиления на выходе комплексного баланса смесителя квадратурные сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$ вида

$$U_1(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \cos[(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_{\text{В}}(t)];$$

$$U_2(t) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \sin[(\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_{\text{В}}(t)],$$

где A_2 - амплитуда опорного сигнала;

φ_2 - фазовый сдвиг между опорным сигналом на входе комплексного балансного смесителя и исходным зондирующим сигналом,

преобразуют сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$ в цифровую форму в виде набора мгновенных значений $U_1(t_i)$ и $U_2(t_i)$ посредством быстродействующего двухканального аналого-цифрового преобразователя, частоту опроса которого выбирают много большей максимального значения частоты вибрации исследуемого объекта, для каждой пары полученных значений $U_1(t_i)$ и $U_2(t_i)$ вычисляют мгновенные значения фазового сдвига φ_i по выражению:

$$\varphi_i = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varphi_{\text{В}}(t_i) = \arctg \frac{U_2(t_i)}{U_1(t_i)},$$

из полученного набора мгновенных значений φ_i определяют Φ_{min} и Φ_{max} , вычисляются значения $\Phi_{\text{ВМ}}$ по выражению:

$$\Phi_{\text{ВМ}} = \frac{\Phi_{\text{max}} - \Phi_{\text{min}}}{2},$$

а амплитуду вибрации $D_{\text{М}}$ определяют по выражению:

$$D_{\text{М}} = \frac{C}{4\pi f_0} \Phi_{\text{ВМ}},$$

где C - скорость света.

Сравнительный анализ с прототипом показывает, что заявляемый способ отличается наличием преобразования квадратурных сигналов в цифровую форму с помощью быстродействующего двухканального аналого-цифрового преобразователя, что позволяет рассчитать амплитудное значение фазы отраженного сигнала под влиянием вибрации исследуемого объекта без необходимости формирования компенсирующего СВЧ-сигнала, т.е. без использования регулирующих СВЧ-устройств (аттенюатора, фазовращателя), а это исключает калибровочную процедуру в процессе измерения и автоматизирует этот процесс. Факторы, влияющие на точность измерений, а именно:

неточность сдвига в плечах комплексного балансного смесителя на $\pi/2$;

неодинаковые амплитудные коэффициенты передачи в каналах комплексного балансного смесителя;

недостаточная направленность направленного ответвителя, что приводит к появлению постоянных составляющих на выходе комплексного балансного смесителя, могут быть учтены и исключены при калибровке измерителя амплитудных вибраций в лабораторных условиях в процессе наладки последнего (а не на месте его установки), что автоматизирует процесс измерения. Кроме того, так как информация о $\Phi_{\text{ВМ}}$ содержится в фазе, а не в амплитуде, нет необходимости выполнения условия малости значения $\Phi_{\text{ВМ}}$ и, следовательно, нет ограничения верхнего значения измеряемой амплитуды вибраций. При этом, так как зондирующий сигнал является сигналом в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, обеспечивается достаточно существенное изменение фа-

BY 13974 C1 2011.02.28

зы отраженного СВЧ-сигнала под влиянием вибрации отраженного сигнала и тем самым достигается высокая чувствительность измерений.

Предлагаемый способ иллюстрируется чертежом, представленным на фигуре.

На фигуре представлена структурная схема измерителя амплитуд вибраций, с помощью которого может быть реализован предлагаемый способ.

Измеритель, с помощью которого может быть реализован предлагаемый способ, содержит СВЧ-генератор (Г) 1, выход которого соединен с входом делителя мощности (ДМ) 2, причем первый выход этого делителя через первичный канал направленного ответвителя (НО) 3, ориентированного на отраженный от исследуемого объекта (ИО) 5 сигнал, подключен к рупорной антенне (А) 4, а второй выход делителя соединен со вторым входом комплексного балансного смесителя (БС) 6, первый вход которого подключен к выходу вторичного канала направленного ответвителя (НО) 3; цифровой выход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 7 соединен с интерфейсом персонального компьютера (ПК) 8; выходы квадратурных сигналов промежуточной частоты комплексного балансного смесителя (БС) 6 подключены к первому и второму входам аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 7.

Заявляемый способ в данном измерителе может быть реализован следующим образом.

СВЧ-генератор формирует зондирующий сигнал, который через делитель мощности (ДМ) 2 и первичный канал направленного ответвителя (НО) 3 подается на рупорную антенну (А) 4, которая одновременно является приемной и передающей. Отраженный от исследуемого объекта (ИО) 5 сигнал через вторичный канал направленного ответвителя (НО) 3 (направленный ответвитель (НО) 3 ориентирован на отраженный сигнал) поступает на первый вход комплексного балансного смесителя (БС) 6. На второй вход смесителя (БС) 6 через делитель мощности (ДМ) 2 поступает часть зондирующего сигнала - опорный сигнал. В смесителе (БС) 6 осуществляется интерференция отраженного и опорного сигналов, выделение квадратурных сигналов, несущих информацию о фазе сигнала, их фильтрация и усиление. Двухканальный быстродействующий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 7, на входы которого поступают квадратурные сигналы, обеспечивает их преобразование в цифровую форму и передачу в персональный компьютер (ПК) 8. В персональном компьютере (ПК) 8 производится математическая обработка сигналов, вычисление и индикация измеряемой амплитуды вибрации.

Измеритель, основанный на предложенном способе, реализован в НИЛ 1.9 "Научно-исследовательская лаборатория аппаратуры и устройств СВЧ" Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Рабочая частота зондирующего сигнала $36,250 \pm 0,250$ ГГц, выходная мощность не менее 10 мВт, рабочий диапазон частоты вибрации от 0 Гц до 31250 Гц, диапазон измеряемых амплитуд вибраций от 1 мкм до 10 мм (разбит на поддиапазоны), основная погрешность измерения не более $\pm 3\%$.

Источники информации:

1. Способ измерения амплитуд вибраций: Патент RU 2217706 C2, МПК G 01H 9/00, 1998.
2. Устройство для измерения амплитуд вибраций. Патент RU 17806 U1, МПК G 01H 9/00, 2001.
3. Викторов В.А., Лукин Б.В., Совлуков А.Ф. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 208 с.
4. Радар для обнаружения вибрации: Патент Соединенного Королевства Великобритании, 2310099 А, 1996.